

〔論 文〕

日本人成人男女の体型を有する人体ファントムの検証 — 実用的な MIRD ファントムへの修正 —

亀井 修*, 衛藤 路弘*

*日本文理大学保健医療学部保健医療学科

Verification of a Human Phantom with the Body Shape of Japanese Adult Men and Women — Modifications to the Practical MIRD Phantom —

Osamu KAMEI*, Michihiro ETO*

*Department of Health Sciences, School of Health Sciences, Nippon Bunri University

Abstract

In Japan, since 2020, medical exposure records are required by law. Evaluation of organ doses during computed tomography (CT) examinations can be performed using tools such as WAZA-ARI. The body shapes of Japanese adults (JM-103 and JF-103) used for dosimetry were voxel phantoms created from CT data of the human body. Although voxel phantoms faithfully reproduce the human body, difficulties arise during the construction of dosimetry systems for radiation work involving complex postures. To address this challenge, we created a mathematical phantom (MIRD phantom) using human body phantoms (JM-103 and JF-103), organ size and position data from clinical images, and material data corresponding to each organ for dosimetry. We then confirmed that the MIRD phantom created by this method resulted in no specific practical problems compared to voxel phantoms such as JM-103 and JF-103.

キーワード：JM-103, JF-103, WAZA-ARI, MIRD ファントム, ボクセルファントム

Keywords : JM-103, JF-103, WAZA-ARI, MIRD phantom, Voxel phantom

1. はじめに

1) 日本の医療被ばくの現状

2019年3月の医療法改正に基づき、2020年4月より、放射線診療を受ける者の当該放射線による被ばく線量の管理及び記録、その他の診療用放射線の安全利用を目的とした改善のための方策を講じることが義務付けられた。

その背景として、医療被ばくについては被ばく線量の制限がなく、被ばくの低減については施設ごとの努力目標とされてきた経緯がある。しかし、日本においてはCT装置の保有台数が、人口100万人当たり米国の約45台に対し日本は約116台と世界の中でも特に際立っており (OECD 2023)¹⁾、国民一人当たりの被ばく線量も世界の中でトップレベルに位置付けられていることがその要因となっている。

2000年代に入ってから、CT スキャン装置の性能の進歩は目覚ましく、その検出器数も16, 32, 64, 128列と増加し、現在では320列のマルチスキャナCT装置へと進化している。その結果、CT検査時における被ばくが他の放射線診断による被ばく線量に比して、格段に多いことが医療現場の課題となっている。これに対して各CT装置メーカーは、自社の装置がいかに低線量であり、そして機能的にその配慮を施している旨の記述を行いつつ他社の装置との差別化を図っているのが現状である。

2004年にイギリスのオックスフォード大学のBerringtonら²⁾は英国および他の14カ国の先進国のX線被ばくによる発がんリスクについて報告した。この論文の中で、BerringtonはX線診断の頻度は日本がもっとも高く、そして発がんの寄与リスクは日本が3.2%でもっとも高く、それは年間7,587の発がん死亡数の増加に相当すると報告した。また、日本以外の国の被ばくの寄与リスクについては2%未満としている。Berringtonはさらに、2009年の米国におけるCT検査件数の推定値を基に、同様な方法で発がんリスクを計算し、2007年の米国内のCT検査によって、将来的に約29,000のがん死亡者数が増加すると推定した。現在日本における医療被ばく線量は、このようなX線CT装置数の増加によって、Berringtonの論文の発表の時に比べて、X線検査数が更に増加していると危惧されている。

2) 医療被ばくの推定ツールについて

さて、医療における被ばく線量の推定値についてはWAZA-ARI³⁾(量子科学技術研究開発機構)はじめ、様々なシミュレーションツール⁴⁾⁵⁾が現在運用されている。その線量推定の際に使用されるファントムとしては、国際的な機関である国際放射線防護委員会(以下ICRP: International Commission on Radiological Protection)をはじめとして、日本においては国立研究法人日本原子力研究開発機構(JAEA)が中心となって作成したファントムを、一般ユーザーが研究のために使用できる体制ができています。しかし、ICRPおよびJAEAが提供するファントムはボクセル(以下voxel)ファントムであり、このファントムをPHITS⁶⁾(Particle and Heavy Ion Transport code System)コードなどのシミュレーションソフトで使用する場合は、体系の構築において一定の知識とデータ変換のツールおよび一定の処理能力を有する計算機が必要とされる。

CT検査時の被ばく量の測定法については、早くから標準化が進められてきた。1984年には、米国食品医薬局

(FDA: Food and Drug Administration)において、円筒形のアクリルファントムを使用した、回転中心の線量評価法(CTDI法 Computed tomography dose index)が提示された。

1996年には、国際原子力機関(IAEA: International Atomic Energy Agency)がBSS9⁷⁾(Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards)電離放射線に対する基本安全基準において、『IAEA ガイドンスレベル』が提示された。このときのIAEAの線量評価法は、円筒形のファントムにタブレット状のTLDを挿入し、コンベンショナルCTのマルチスキャンでの回転中心での平均吸収線量で評価を行った。

2002年の国際電気標準会議(IEC: International Electrotechnical Commission)の『CTに対するX線装置の安全に対する特定要求項目』の中で、CTDI_{100c}, CTDI_{100p}, CTDI_w, CTDI_{vol}, DLP(Dose Length Product), などの測定方法が提示された。近年のCT装置では、CT検査の終了後、装置のコンソール上にCTDI_{vol}およびDLPの値を表示できるようになっている。しかし、CTDI法による測定方法は、頭部では16cm、そして腹部では32cm(IAEAは30cm)の円筒形ファントムの線量測定値であり、実際の被験者の被ばく線量を表してはいないという欠点があった。そこで、より人体の各臓器の被ばく線量を詳細に求めるために、モンテカルロ法を利用した、ImPACT法⁸⁾やCT-EXPO法⁹⁾が利用されて来た。この中で、ImPACT法は数学ファントムを、頭から骨盤まで5mmスライス厚の208スラブに分割し、NRPB-SR250¹⁰⁾のデータベースを利用して人体の27の臓器線量を求めることができるツールである。しかし、ImPACT法における線量評価の標準体格は、欧米人の体格を基準とした線量評価であり、体格の小さい日本人の体型では過大評価になることが懸案となっていた。また、欧米人の場合でも測定された被ばく線量は、あくまでも標準的な体型における被ばく線量評価であり、標準と異なる体型の場合は被ばくの推定値が正しい数値を表していないことに注意する必要がある。

2. ファントムの歴史と研究

わが国では日本人の体型にあった正確な線量評価を行うため、日本原子力研究開発機構でJM-103(男性)、JF-103(女性)のボクセルファントムを開発し、臓器の線量評価についてはそれぞれのファントムを使用し、PHITSコードを用いて行っている¹¹⁾。JM-103ファントムは、

身長が171cm, 体重が65kgであり, またJF-103ファントムは身長155cm, 体重52kgである。しかし, 正確な臓器線量を算定するためには, それぞれのファントムと検査を受ける日本人の実際の体型との違いから, 何らかの補正を行う必要がある。著者は, これまでJM-103ファントムおよびJF-103ファントムと, 臨床における被験者の体型との差異に対する補正方法について報告してきた¹²⁾。現在 Web 上で使用できる WAZA-ARI は, JM-103およびJF-103を標準体型として, あらかじめ標準体型を「痩せ」および「太らせ」させたファントムを作成し, それらの評価結果のデータベースを構築して, CT 検査の臨床業務で遭遇する日本人の一般的な成人の男女の臓器線量の評価を行っている。

1983年放射線医学総合研究所（現在の量子科学研究機構）においては, Oak Ridge の MIRD (Medical Internal Radiation Dosimetry) ファントム（古典的数学ファントム: A mathematical model of a phantom）を日本人体型への変更を行った¹³⁾。その変更方法として欧米人より小さな日本人に合わせるため, Oak Ridge ファントムを一定の縮小率で再構築した¹⁴⁾。主な臓器の縮小率としては, 20歳の場合で, 体重を0.770倍, Liver 0.836倍, Lung 0.916倍, kidney 0.937倍, Spleen 0.752倍, ただし Pancreas は2.03倍とした。

1994に当時の日本原子力研究所（現在の原子力研究開発機構）の樋口らは, Oak Ridge 型の MIRD ファントムを構築して, モンテカルロシミュレーションによる臓器線量の推定を初めて行った。しかし, ICRP Publication 110¹⁵⁾において, MIRD ファントムではなく, 実際の人体の CT 検査で得られた画像データから構築した Voxel ファントムを使った臓器線量の推定を行うこととした。それらのファントムは男性型が AM, 女性型が AF と呼ばれ, AM は身長176cm, 体重73kg, また AF は身長163cm, 体重60kg, それぞれ欧米人の標準体型を参考に構築された。

日本原子力研究開発機構（JAEA）の斎藤, 佐藤らは AM, AF ファントムを基本体型として, 日本人の標準体型の Voxel ファントムの構築を行った。2001年から日本人男女の標準体型のファントムとして, Otoko¹⁶⁾ (Saito 2001)およびOnago¹⁶⁾, JM-60¹⁷⁾およびJF-60¹⁷⁾, そして現在の標準ファントムであるJM-103およびJF-103を開発した。このうち成人男性のファントムは, Otoko (身長170cm, 体重65kg), JM-60 (身長171cm, 体重65kg), JM-103 (身長171cm, 体重65kg) と大きな変更はない。しかし, 成人女性ファントムはOnago (身長162cm, 体重57kg), JF-60 (身長152cm, 体重44kg),

JF-103 (身長155cm, 体重52kg) と変化して来ている。WAZA-ARI はこの中でJM-103¹⁸⁾およびJF-103¹⁹⁾ファントムを標準ファントムとして使用されている。また, 女性データでは, JF-60を一定の割合で (XY 軸方向: 1.0764倍, およびZ軸方向: 1.02倍) 拡大して作成されたのがJF-103であり, したがって両ファントムは相似形となる。現在においては, JAEA で開発された, JF-103ファントムが日本人の標準体型として用いられている。

Voxel ファントムが出現する以前のファントムは, 数学ファントムであり, 一般的に MIRD ファントムとも呼ばれている。数学ファントムは, 各臓器を数式で構築するため, Voxel ファントムに比べて計算機に対する負荷は大幅に少なくなり, シミュレーション時の計算速度の高速化が可能である。しかし, 体内の臓器の位置については, 実際の人体における配置とは異なっている。しかし, 数学ファントムはX線の照射体系の構築に置いて自由度が高く, 腕や脚および胴体の屈曲や伸展が比較的容易である。したがって, 医療現場のみならず放射線被ばくを伴う様々な場面における体系の構築に柔軟に対応できると考えられる。そこで, 本研究ではJM-103, JF-103ファントムおよび日本人成人男女の CT 画像（臨床画像）の分析結果から, その臓器の体積及び位置関係を求め, そのデータを使用して数学ファントムの作成を検討した。

3. 方法

本研究においては前述したようにJM-103, JF-103を日本人の標準体型として, それより体重が約-15kg から+20kg 程度の範囲で, 国家公務員共済連合組合会新別府病院（大分県別府市鶴見3998番地）で検査を行った患者の, 匿名化された CT 検査画像から得られた体型データ（男性11人, 女性10人）を用いて分析した。（本研究においては大分県立看護科学大学研究倫理安全委員会の承認を受けた。受付番号: 629 申請日 2011. 10. 20）

体型の計測方法は, 自作の体型計測機能を有した CT 画像ボクセル変換ソフトの他, ImageJ (National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, USA.) を用いて行った。いずれも, 最終的に臨床画像データを PHITS コード用 (Ver. 3. 24) のデータ形式に変換した。

体型の分類方法として, 身長 (Height), 体重 (Weight), 周囲長 (図1) (Perimeter), BMI, AP 長 (C-AP, A-AP), LAT 長 (C-LAT, A-LAT), 有効直径²⁰⁾ (図2) (Effective diameter: CED, AED) など

の各項目について計測を行った。

更にPHITSコードの体積測定機能を用いて、肺 (Lung)、心臓 (Heart)、肝臓 (Liver)、胆のう (Gall-bladder)、胃 (Stomach)、すい臓 (Pancreas)、腎臓 (Kidney)、脾臓 (Spleen)、膀胱 (Bladder)、子宮 (Uterus) (女性のみ) の臓器体積を測定し、JM-103およびJF-103のデータと比較した。

次に、男性11体、女性4体の臨床画像のスライスごとの臓器面積のデータを使用し、各臓器位置の計測を行った。臓器位置の指標としては、胸部上縁から足側へ、肺、心臓、肝臓、胃、胆のう、脾臓、すい臓、腎臓、子宮、膀胱と、それぞれの臓器の出現する位置から臓器のスタート位置を(S)とし、終了位置をエンド(E)として求めた。

最後に、JM-103の体型データから臓器体積および臓器の位置を反映したMIRDファントムを構築し、PHITSコード(Ver.3.24)により、JM-103とMIRDファントムそれぞれの胸部(心臓)と腹部(肝臓)に対してシミュレーションによる線量の推定を行った。

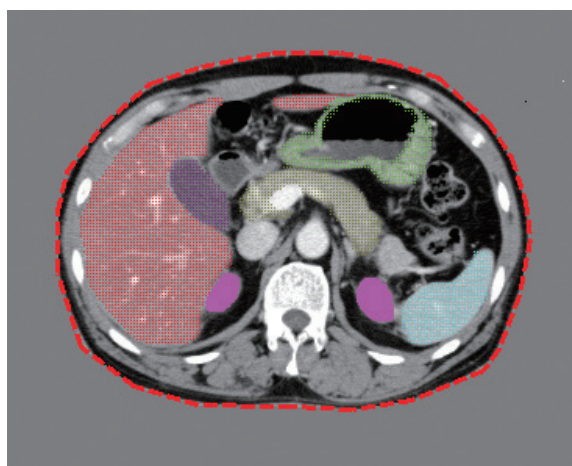


図1 周囲長 (Perimeter) : 赤色の点線の長さ

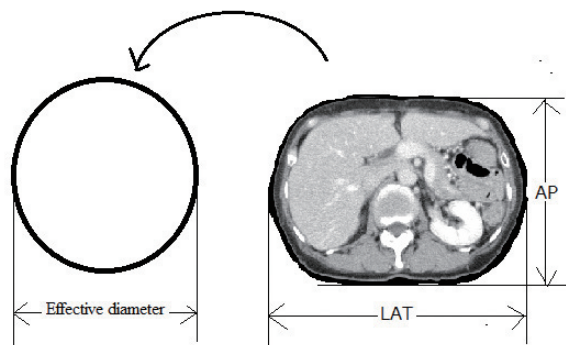


図2 体型の計測の概要: 有効直径(ED) = $\sqrt{AP \times LAT}$

4. 結果および考察

1) 体型計測結果

JM-103, JF-103ファントムおよび臨床画像から作成したファントムの体型の計測結果は、表1および表2のとおりである。日本人の平均的な体型として作られたJM-103ファントムは、身長が171cm、体重が65kgであり、またJF-103は、身長が155cm、体重が52kgであった。また、使用した臨床画像のデータは身長、体重、年齢および、それぞれ各臓器の体積 (Volume) の計測結果を示している。また、C-AP, C-LAT, C-Perimeter (C-Per), CEDは胸部におけるAP長, LAT長, Perimeter (周囲長), 有効直径 (ED) の計測結果であり、A-AP, A-LAT, A-Perimeter (A-Per), AEDは腹部におけるそれぞれの計測結果である。「Ave: Average」は各項目の平均値を表している。誤差率 (%) は、JM-103およびJF-103の標準値に対する、臨床画像データの各値の誤差を表している。

スライスごとの臓器面積のデータの結果から、男性11名の計測結果を表3、女性4名を表4に示した。胸部上縁の位置を0mmとして、膀胱下縁の位置をBladderのEとして表し、骨盤下端とした。

JM-103, JF-103の両ファントムおよび臨床画像データとも、各スライスの間隔は4mmである。各臓器の始まりを「S」とし、臓器終了の位置を「E」とした(表3, 表4)。その結果JM-103ファントムは、胸部上縁から膀胱下縁までの長さが568mmであることが明らかになった。また同様に、JF-103ファントムでは548mmであった。臨床画像データの平均値は男性が517mmで、女性が445mmであった。また、胸部上縁から骨盤下端(膀胱:E)までの値をL(mm)として、身長(cm)を除いた値(Hight/L)を表の右端に示した。男性はJM-103の3.0に対して臨床画像は2.9±0.1であった。また、女性はJF-103の2.8に対して3.6±0.1であった。SDは臨床画像データの標準偏差であり、誤差率(%)はJM-103およびJF-103の測定値に対する誤差率(%)を表している。胸部上縁から骨盤下端までの臓器の位置における変化のグラフを図3および図4に示した。

表1 男性ファントムの体型計測結果

[cm]															
項目	JM103	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	Ave	誤差%	
Height	171	172	163	170	158	174	160	170	172	172	163	170	168	1.8	
Weight	65	55	55	60	64	66	67	75	78	90	64	80	69	-5.8	
BMI	22.2	18.5	20.7	20.7	25.6	21.7	26.2	25.9	26.3	30.4	24.1	27.7	24	-7.5	
Lung	5240	4894	4838	5032	3839	5480	4291	4858	4848	5058	3382	2441	4451	17.7	
Heart	896	755	823	752	728	659	758	1013	1085	937	1132	718	851	5.3	
Liver	1240	1487	1513	1423	1584	1380	1086	1343	1529	1887	1110	1530	1443	-14.1	
Gallbladder	16	22	20	10	39	19	55	26	10	32	34	19	26	-38.5	
Stomach	118	175	158	65	223	183	172	122	221	191	127	123	160	-26.3	
Pancreas	113	98	57	40	89	64	78	58	99	79	59	41	69	63.8	
Kidney	252	343	351	333	310	320	323	306	313	306	260	369	321	-21.5	
Spleen	132	142	199	128	109	144	109	71	200	121	130	237	145	-9.0	
Bladder	36.9	75	48	40	46	49	58	37	44	66	55	40	51	-27.6	
Chest (cm)	C-AP	22.1	20.2	20.1	20.6	22.1	21.3	23.3	26.2	23.9	26	23	23	22.7	-2.6
	C-LAT	33.3	29.8	32.8	32.3	32.8	33.5	32.2	36.1	35.8	34.9	31.4	34.9	33.3	0
	C-Per	93.7	81	86.8	86.9	89.5	87.6	89.9	101	96.3	98.5	90	93.7	91.0	3.0
	CED	27.1	24.5	25.7	25.8	26.9	26.7	27.4	30.8	29.3	30.1	26.9	28.3	27.5	-1.5
Abdomen (cm)	A-AP	21.5	18.1	20.8	20	22.3	21.2	25.5	26.8	25	26.2	22.8	25.6	23.1	-6.9
	A-LAT	30.7	25.3	31.2	31.2	30.3	30.4	32.1	33.2	34	34.2	31	33	31.4	-2.2
	A-Per	83.8	70.2	84.8	84.4	84.9	82.6	91.6	97.5	96.5	97.7	89.3	92.9	88.4	-5.2
	AED	25.7	21.4	25.5	25	26	25.4	28.6	29.8	29.2	29.9	26.6	29.1	27.0	-4.8

表2 女性ファントムの体型計測結果

													[cm]	
項目	JF103	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	Ave	誤差%	
Height	155	155	155	155	155	158	162	166	152	152	170	158	-1.9	
Weight	52	39	70	70	56	51	51	54	74	75	53	59	-13.5	
BMI	21.6	16.2	29.1	29.1	23.3	20.4	19.4	19.6	32.0	32.5	18.3	24	-11.1	
Lung	4932	3567	3470	2981	3720	3594.6	5106.0	3570.0	4119.0	3636.4	3601.6	3737	24.2	
Heart	725	612	664	708	785.2	726.4	825.0	853.6	704.7	719.1	798.9	740	-2.1	
Liver	1123	1141	1249	1058	1255	1012.3	1240.6	962.7	1136.0	2372.5	1111.0	1254	-11.7	
Gallbladder	6.7	1.7	29	39.8	29.2	16.0	18.2	11.0	29.1	34.4	10.8	22	-228.4	
Stomach	119.4	44.5	105.0	130	141.8	51.0	146.4	132.5	149.6	150.8	100.1	115	3.7	
Pancreas	106.8	25.5	15.2	42.7	50.5	38.2	49.6	36.8	58.4	61.7	39.7	42	60.7	
Kidney	237.8	258	283.4	344	305	277.0	251.0	243.0	338.6	487.2	241.5	303	-27.4	
Spleen	61.6	41.6	85.5	141.7	81.1	43.5	91.0	129.7	157.0	298.2	83.1	115	-86.7	
Bladder	22.2	38.7	42.9	55.4	88.9	49.6	40.5	65.1	72.5	32.7	25.7	51	-129.7	
Uterus	52.2	50.2	53.1	72.1	38.1	46.5	65.1	101.8	71.9	157.3	46.6	70	-34.1	
Chest	C-AP	22	18.5	24.2	23.9	21.2	20.9	19.9	18.8	26.3	27.1	21.89	0.5	
	C-LAT	29.9	24	34	35.6	31.6	32.7	31.3	31.9	33	37.4	32.18	-7.6	
	C-Per	91.1	71.1	94.3	98.9	86.7	88.5	87	84.2	96.4	107	79.8	89.39	1.9
	CED	25.7	21.1	28.7	29.2	25.9	26.1	25	24.5	29.5	31.8	23.4	26.52	-3.2
Abdomen	A-AP	18.7	15.3	25.5	25.3	20.8	20.1	18.3	19.3	26.4	27.9	21.67	-15.9	
	A-LAT	25.2	24.5	32.8	32.6	30.2	29	30	27	33.9	33	29.96	-18.9	
	A-Per	73.4	66.3	93.5	96.2	82.9	84.4	81.6	76.7	96	98.6	72.8	84.9	-16.7
	AED	21.8	19.7	28.9	29.1	25	24.1	23.4	22.8	29.9	30.3	21.8	25.5	-17.0

表3 JM103および臨床画像データの臓器位置の計測結果

	Organ position																				Hight/L
	Height		Lung		Heart		Liver		Stomach		Gallbladder		Spleen		Pancreas		Kidney		Bladder		
	cm	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E		
JM	171	4	288	52	228	212	372	244	380	288	316	256	340	280	364	280	392	528	568	3.0	
1	172	5	290	100	245	230	400	255	355	315	380	250	325	300	385	280	425	550	625	2.8	
2	163	10	265	90	240	220	375	240	340	255	305	240	330	285	305	275	390	515	555	2.9	
3	170	5	275	110	245	225	385	245	315	290	305	240	285	270	335	280	405	545	565	3.0	
4	158	5	255	90	200	195	345	215	280	260	310	220	290	255	305	275	375	505	540	2.9	
5	174	10	285	90	240	225	385	250	335	315	345	255	310	285	335	305	405	550	595	2.9	
6	160	5	270	80	210	185	320	220	260	250	305	240	305	255	300	265	370	500	530	3.0	
7	170	10	265	85	210	190	335	220	275	250	265	210	260	250	300	250	365	510	545	3.1	
8	172	5	255	80	235	195	325	235	280	265	300	240	330	285	320	300	390	530	565	3.0	
9	172	5	285	100	235	205	365	250	315	280	320	250	320	295	325	290	415	535	590	2.9	
10	163	5	250	80	210	160	285	210	250	215	245	210	285	250	280	275	365	515	550	3.0	
11	170	5	230	75	185	160	335	200	270	240	260	200	285	250	280	250	370	555	585	2.9	
Avg	168	6.4	266	89	223	199	350	231	298	267	304	232	302	271	315	277	389	528	517	2.9	
SD	5.6	2.3	18.2	14.8	19.9	23.9	33.6	18.2	41.4	30.0	36.7	19.3	24.4	18.9	31.7	16.8	20.4	19.1	145.7	0.1	
誤差%	2.0	-59.1	7.7	-71.3	2.1	6.1	5.8	5.4	21.7	7.4	3.9	9.3	11.1	3.2	13.3	1.1	0.9	0	9.1		

「S」は臓器位置のスタート。「E」は臓器位置の終了を示す。

表4 JF103および臨床画像データの臓器位置の計測結果

	Organ position																					[mm]
	Height	Lung		Heart		Liver		Stomach		Gallbladder		Spleen		Pancreas		Kidney		Uterus		Bladder		Hight/L
		S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	
JF	155	4	276	40	228	216	372	236	444	312	336	260	320	300	384	268	372	504	572	508	548	2.8
1	158	4	196	56	156	132	240	168	196	192	204	188	240	204	240	188	284	376	416	416	432	3.7
2	152	4	200	64	156	148	256	168	240	216	248	164	228	196	232	200	300	368	428	384	428	3.6
3	162	4	224	60	196	184	300	200	288	268	296	200	232	228	272	228	316	396	452	436	456	3.6
4	166	4	216	60	184	172	280	184	264	236	252	180	236	212	252	200	312	408	452	420	464	3.6
Avg	160	4	209	60	173	159	269	180	247	228	250	183	234	210	249	204	303	387	437	414	445	3.6
ST	6.0	0	13.2	3.3	20.2	23.4	26.4	15.3	39.2	32.2	37.6	15.1	5.2	13.7	17.4	17	14.4	18.3	18	21.8	17.7	0.1
誤差%	-2.9	0	24.3	-50.0	24.1	26.4	27.7	23.7	44.4	26.9	25.6	29.6	26.9	30.0	35.2	23.9	18.5	23.2	23.6	18.5	18.8	

「S」は臓器位置のスタート。「E」は臓器位置の終了を示す。

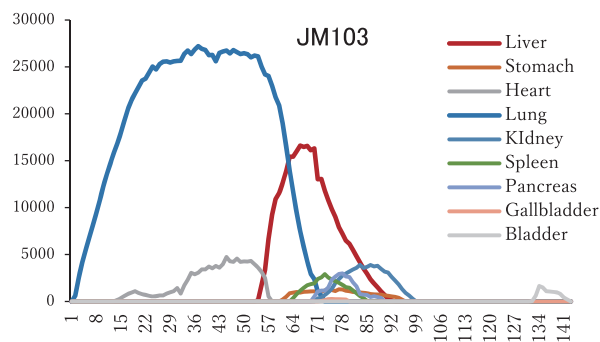


図3 JM-103の臓器位置グラフ

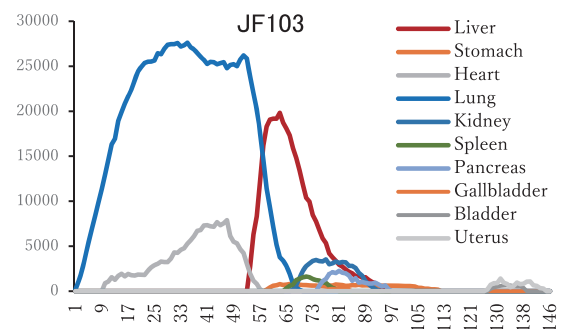


図4 JF-103の臓器位置グラフ

2) 体型の分析

日本人男性標準体型のファントムである JM-103は身長が171cm 体重が65kg である。それに対して、今回計測した男性の臨床画像データ11体の男性の身長の平均値が168cm 体重が68kg であった。また女性の標準体型である JF-103の身長155cm 体重52kg に対して、女性の臨床画像データ10体の平均値は身長が158cm 体重が59kg であった。

男性の身長は150cm から170cm の間で分布し、体重は55kg から最大90kg と35kg の差があった。また、BMI は最小値が18そして最大値が30であった。また女性の場合は、身長は、152cm から170cm まで分布し、体重は38kg から70kg まで32kg の差があった。女性の BMI は最小値が16.2, 最大値が32.5であった。

臓器の体積の標準体型との誤差率は、男性は最小が5.3% (心臓) で最大は63.8% (脾臓) であった。全体として、肺 (17.7%), 心臓 (5.3%), すい臓 (63.8%) 以外の臓器は臨床画像データが大きかった。また、女性の場合の誤差率は最小が2.1% (心臓) で最大が228.4% (胆のう) であった。全体として、肺 (24.2%), すい臓 (60.7%), 胃 (3.7%) 以外の臓器は臨床画像データが大きかった。

胸部 (Chest) および腹部 (Abdomen) の AP 長, LAT 長, Perimeter (周囲長), 有効直径 (ED) の誤差について、男性の胸部領域の誤差率は $\pm 3.0\%$ 以下であった。また腹部領域ではすべての項目において、臨床画像データが大きくなり、誤差率は -7% 以下であった。女性の胸部領域の誤差は C-LAT が -7.6% で、他は $\pm 4.0\%$ 以下であった。しかし、腹部領域ではすべての項目において臨床画像データが大きく、誤差率も -15% から -19% の範囲であった。

胸部上縁から、膀胱下縁までの長さに対する身長の比率について、男性の場合は JM-103の3.0に対して臨床画像データの平均値は2.9であり、それほど大きな差はなかった。しかし、女性の場合は JF-103の2.8に比べて臨床画像データの身長との比率の平均値が 3.6 ± 0.1 と、0.7と大きな差があった。

これらの結果から、JM-103ファントムは臓器位置や体積は、日本人男性の臨床画像データとの差は許容範囲であると考えられた。しかし、JF-103ファントムは臓器位置においてサンプル数が4体の平均値ではあるが、日本人女性の平均値とは大きく異なっていた。また、腹部内臓器の体積および腹部領域の AP 長や LAT 長、そして周囲長も同様に約20%程度小さくなっていた。

3) 日本人の体型への MIRD ファントムの修正

1994年に樋口らが考案した、古典的数学ファントム (以下 MIRD ファントム) を図5に示した。MIRD ファントムは、欧米人の標準体型の身長174cm 体重70kg の体型である。図6のファントムは、日本人の標準体型の JM-103ファントムに近似したファントムで、上腕を除去し、肺の容積および各臓器の物質 (material) データを参考に構築した。

また、JM-103および JF-103の体型を PHITS コードにより描出した画像を図7, 図8に示した。MIRD ファントムは身長が174cm で上半身の長さは70cm で男性、女性兼用のファントムで、欧米人に近い体型を有している。このファントムを日本人男性の標準体型に近づけるために、臓器の体積、および胸・腹部の LAT 長を40cm から30cm に変更した。さらに肺の体積および、各臓器の物質データを JM-103の肺、心臓、肝臓の値に変更した。肺の体積は MIRD ファントムの $3,364\text{cm}^3$ から $4,571\text{cm}^3$ へ変更した。また、心臓のおよび肝臓の体積を 790cm^3 , 肝臓の体積を $1,250\text{cm}^3$ に変更した。変更したファントムを図6に示した。このファントムを以下 JM-MIRD ファントムと呼称することとする。

4) 線量シミュレーション結果

JM-103と JM-103の体型に近似した MIRD ファントムを構築して PHITS コードにより線量シミュレーションを行った。図9は JM-MIRD ファントムの胸部・心臓に照射したときの線量分布図である。また、図10は同じく腹部 (肝臓) に照射したときの線量分布図である。図11及び図12は JM-103の胸部および腹部に照射したときのそれぞれ線量分布図である。表5に JM-103ファントムと JM-MIRD ファントムの線量照射シミュレーションの結果を示した。

MIRD ファントムが考案された時の臓器の物質データは、肺 (Lung) と軟部組織 (Soft tissue) および骨格 (Skelton) の三つであった。それぞれ密度 (g/cm^3) は、0.296 (肺), 1.04 (軟部組織), 1.4 (骨格) であった。それに対して、JM-103はすべての臓器の組成が物質データ (material) として用意してあり、コードを使用する際はプログラム上に記載して使用する。本研究では表5の肺 (0.26), 心臓 (1.05), 肝臓 (1.05) のように、JM-103の物質データを JM-MIRD に利用した。JM-MIRD ファントムの臓器体積は、可能な限り JM-103ファントムの体型に近似するように構築した。PHITS コードによる線量シミュレーション結果は、それぞれの心臓の中心部と肝臓の中心部に1回照射したときの線量である。

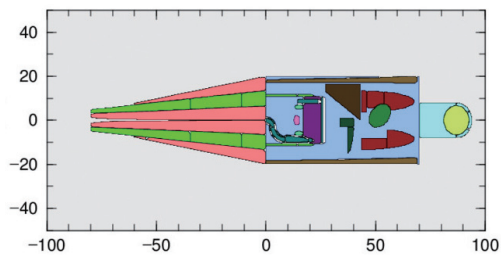


図5 MIRD ファントム

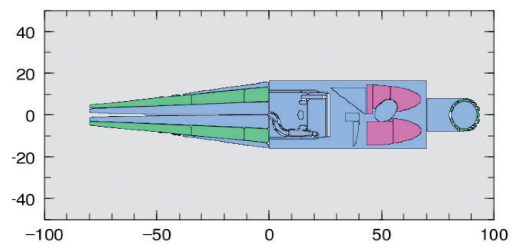


図6 JM-MIRD ファントム

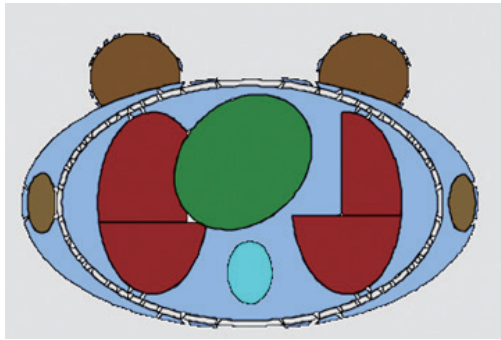


図7 JM-103の胸腹部の臓器

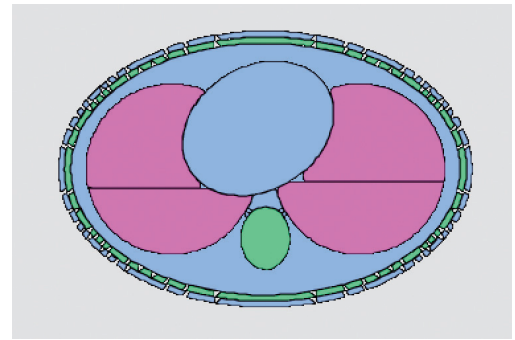


図8 JF-103の胸腹部の臓器

結果は、肝臓の線量は同等の線量となったが、肺と心臓の線量は誤差が大きかった。これは、JM-103に比べてJM-MIRDの肺の体積の影響か、他の影響に起因するものかを検証したい。

5. 結論

日本人の標準体型としてJM-103およびJF-103のファントムがJAEAにより制作された。このうちJM-103ファントムは臨床画像データと比較した結果、臓器の体積および臓器の位置がほぼ等しいことを確認した。しか

し、JF-103ファントムは腹部領域のサイズが、成人女性の臨床画像データの平均と比較して結果、やや小さいことが明らかになった。また、臓器の位置についても若干異なっていた。これについては、調査対象の臨床画像データのサンプル数を増やして、臓器位置の検証を続けたい。

Voxel ファントムは高精細で臓器における被ばくの影響を検証する場合は有効であり、今後利用する機会が増加してくることは明らかである。しかし、放射線治療や撮影業務における術者の放射線防護などに使用する場合は、体系中にファントムを配置する場合に困難な場合が

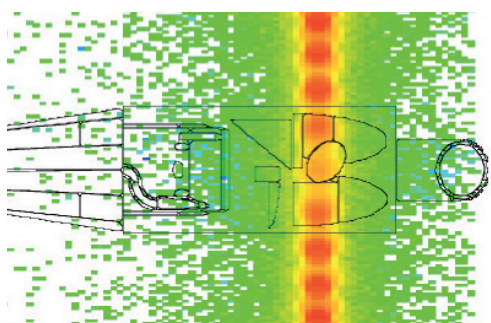


図9 MIDR ファントムにおける胸部照射の線量分布

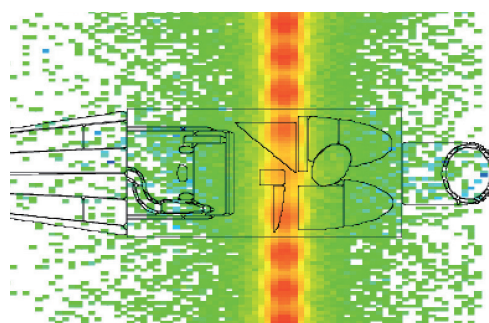


図10 MIDR ファントムにおける腹部照射の線量分布

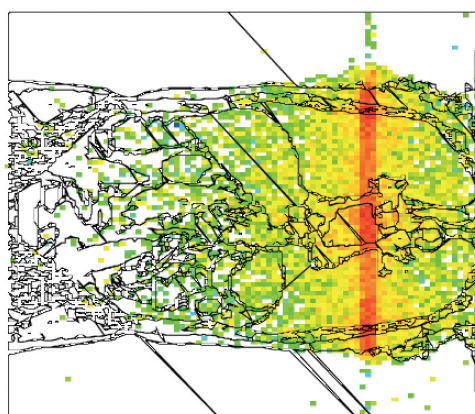


図11 JM-103ファントムにおける胸部照射の線量分布

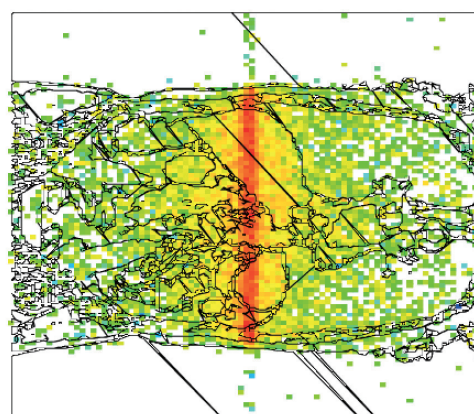


図12 JM-103ファントムにおける腹部照射の線量分布

表5 JM-103および JM-MIRD の線量シミュレーション結果

臓器	JM-103 ファントム			JM-MIRD ファントム		線量の誤差率%
	臓器密度 g/cm ³	臓器体積 cm ³	臓器線量 μGy/mAS	臓器体積 cm ³	臓器線量 μGy/mAS	
肺(Lungs)	0.260	4,205	13.7	4,571	10.2	25.5
心 臓(Heart)	1.05	753	13.9	790	19.2	-38.1
肝 臓(Liver)	1.05	1,385	15.1	1,250	14.6	3.3

ある。

本研究では、JM-MIRDのような数学ファントムは感受性臓器の体積や臓器の位置の変更、いわゆる体型の変更が比較的容易に構築できることが明らかになった。また、被ばく線量の推定もVoxelファントムと比較して、大きな差がないことを確認することができた。

参考文献

- 1) OECD INDICATORS; Health at a Glance ; 2023
- 2) Berrington de Goncez A, Darby S. (2004) Risk of cancer from diagnostic X-rays: estimates for UK and 14 other countries. Lancet ; 363 : 345-51.
- 3) Takahashi F, Endo A, Sato K, Hasegawa T, Katsunuma Y, Ono K, Yoshitake T, Ban N, Kai M. Analysis of organ doses from computed tomography (CT) examination by the radiation transport calculation to develop the dosimetry system, WAZA-ARI. nol.ucl. Sci. Technol. 1, 517-520, 2011.
- 4) Jones D G, Shrimpton P C. Survey of CT practice in UL-Part III Normalized organ doses calculated using Monte Carlo techniques-, NRPB-R250, National Radiological Protection Board (NRPB), 1991.
- 5) Waters L, MCNPX version 2.5.C, Los Alamos National Laboratory Report No. LA-UR-03-2202, 2003.

- 6) Tatsuhiko Sato a, Koji Niita b, Norihiro Matsuda ;
(2013) Particle and Heavy Ion Transport code
System, PHITS, version 2.52 : Journal of Nuclear
Science and Technology, Vol. 50, No. 9, 913-923.
- 7) BBS9 : ([https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/
chousa/gijyutu/004/004/shiryu/021201e.htm](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/004/004/shiryu/021201e.htm))
- 8) ImPACT. Imaging Performance Assessment of CT
scanners (ImPACT). 2006. Available at [www.imp
actscan.Org/ctdosimetry.htm](http://www.impactscan.Org/ctdosimetry.htm). Accessed.
- 9) Galanski M, Nagel HD, Stamm G. (2001) Exposi-
tionsdosis bei CT-Untersuchungen: Ergebnisse
einer bundesweiten Umfrage. Fortschr. Roent-
genstr. ; 172 : M164-M168, table 1.
- 10) Jones D G, Shrimpton P C, (1991) Survey of CT
practice in UL-Part III Normalized organ doses
calculated using Monte Carlo techniques-, NRPB-R
250, National Radiological Protection Board
(NRPB) ; NRPBR250.
- 11) Iwase H, Niita K, Nakamura T, (2002) "Develop-
ment of general purpose particle and heavy ion
transport Monte Carlo code," J. Nucl. Sci. Technol. ,
39 : 1142.
- 12) Kamei, O; Ojima, M; Yoshitake, T; Kai, M. Calculat-
ing patient-specific organ doses from adult body
CT scans by Monte Carlo analysis using male-
individual voxel phantoms. Health Phys. 108 (1),
44-52, 2015.
- 13) Yamaguchi H, Nishizawa K, et al. A Computer
Program to Calculate MIRD Table for Japanese
Physiques. 保健物理, 18, 43-48 ; 1983
- 14) Higuchi K, Yamaguchi Y, ; (1994) 複雑な幾何形
状によって表現された体型における MCNP コード
の適用性に関する検討 ; JAERI-M report are is-
sued irregularly.
- 15) Maria Zankl. (2010) Adult Male and Female Ref-
erence Computational Phantoms; jpn. J.Health
Physic ; 48 (4), 357-369.
- 16) Saito K, Wittmann A, Koga S, et al. (2001) Con-
struction of a computed tomographic phantom for
a Japanese male adult and dose calculation system.
Radiat Environ Biophysics. ; 40 (1) : 69-67.
- 17) Sato K, Noguchi H, Emoto Y, et al., (2007) "Japa-
nese adult male voxel phantom constructed on the
basis of CT images," Radiat. Prot. Dosim., 123
(3) : 337 ; 344.
- 18) Sato K, Koga S, Ida Y, et al. (2008) Construction of
a voxel phantom based on CT data for a Japanese
female and its use for calculation of organ dose s
from external electron. Jpn J Health Phys ; 43
(3) : 337-344.
- 19) Sato K, Noguchi H, Emoto Y, et al. (2009) Develop-
ment of a Japanese adult female voxel phantom. J
Nucl Sci Technol ; 46 (9) : 907-913.
- 20) American Association of Physicists in Medicine,
(2011) Size-Specific Dose Estimates (SSDE) in
Pediatric and Adult Body CT Examinations. New
York: AAPM; Report No. 204.

(2023年11月13日受理)